M. Maşaýew

Fiziki kinetika

Ýokary okuw mekdepleriniň talyplary üçin okuw gollanmasy

Türkmenistanyň Bilim ministrligi tarapyndan hödürlendi

Aşgabat
2010

Sözbaşy

Türkmenistanyň hormatly Prezidenti Gurbanguly Berdimuhamedow Beýik Galkynyş eýýamynda ýurduň bilim we ylym ulgamyny dünýä derejesine çykarmak, talyplara bilim berlişiniň usulyýetini kämilleşdirmek hem-de täze okuw kitaplaryny, gollanmalaryny taýarlamak işlere uly üns berýär.

Hakykatdanam, häzirki zaman ylymlarynyň we tilsimatlarynyň gazananlaryny ykdysadyýetiň dürli pudaklaryna ornaşdyrmagy başarýan hünärmenleri taýarlamak üçin ýokary okuw mekdepleriniň talyplaryny döwrebap okuw kitaplary we okuw - usuly gollanmalar bilen üpjün etmek esasy meseleleriň biri bolup durýar.

“Fiziki kinetika” umumy nazary dersi hökmünde Magtymguly adyndaky Türkmen döwlet uniwersitetiniň fizika fakultetinde fizika hünäri boýunça okaýan talyplar üçin öňden bäri geçilýär. Bu seredilýän dersiň häzirki zaman ylmyň we tehnikanyň ösmeginde uly ähmiýete eýe bolandygyny görkezýär.

Gaty jisimleriň fizikasynda, suwuklyklaryň we gazlaryň fizikasynda, mikro- we nanoelektronikada, tejribelikde peýdaly bolan fiziki häsiýetleri özünde jemleýän täze materiallaryň ýaýlasynda gazanan ägirt uly progress kinetiki hadysalary öwrenýän ylym bilen baglylykdadyr.

Häzirki wagta çenli türkmen dilinde umumy fizikasy dersi boýunça taýarlanan okuw gollanmalarda durli gurşawlarda bolup geçýan kinetiki hadysalaryň nazaryýeti bilen bagly bolan soraglar ýeterlik möçberde ýazyp beýan edilmändir. Şonuň üçin bu gollanmada fiziki kinetika boýunça ylmy edebiýatlarda ýygnalan materiallary tertibe salmak we olary ýokary okuw mekdebiň talyplaryna aýdyň we düşnükli görnüşde beýan etmeklik maksat edilýär.

Okuw gollanmada fiziki kinetika bilen bagly bolan soraglaryň hemmesini ýazyp beýan etmek goýulmandyr. Gollanmanyň esasy maksady geljekki hünärmenleri kinetiki hadysalaryň esasy aýratynlyklary we dürli gurşawlarda we durli şertlerde bolup geçýän kinetiki prosessleriň mehanizmleri bilen tanyşdyrmakdan durýar.

1. Gazlaryň kinetiki nazaryýeti.

Fiziki kinetika - statistiki deňagramsyz ulgamlardaky prosessleriň mikroskopiki nazaryýeti. Statistiki deňagramly ulgamlaryň häsiýetlerine tapawutlylykda kinetiki häsiýetler dürli obýektlerdäki mikroskopiki özaratäsirleşmeleriniň häsiýetlerine has berk bagly bolýarlar. Şonuň üçin, kinetiki häsiýetler has dürli bolýarlar we olaryň nazaryýeti has çylşyrymly bolýar.

Gazlaryň, plazmanyň, suwuklyklaryň, gaty jisimleriň kinetikasy bolýar. Bu bapda üns gazlaryň nazaryýetine berilýär, sebäbi gazlar kinetiki nazaryýetiniň iň ýönekeý obýekti bolýarlar.

Elektrik taýdan neýtral atomlardan ýada molekullardan düzülen hemişeki hyýaly gazlaryň kinetiki nazaryýetine seredeliň. Hyýaly gazlardaky deňagramsyz ýagdaýlar we prosessler bu nazaryýetiň predmeti bolup durýar. Hyýaly gaz diýip şeýle seýrek gaza diýilýär, haçanda ondaky her molekul ähli wagtlap erkin ýaly hereket edýär, başga molekulalar bilen diňe çaknyşyklarda özara täsirleşýär. Başgaça aýdylanda, molekullaryň arasyndaky ortaça aralyk $\bar{r} \sim N^{-1/3}$ (N - göwrüm birligine düşýän molekullaryň sany) olaryň hususy ölçeglerine görä uly guman edilýär, has takyk aýdylanda, molekullarara güýçleriň täsiriniň d radiusyna görä. $Nd^3 \sim (d/\bar{r})^3$ kiçi ululyga „gazlylygyň parametri“ diýilýär

Gazyň statistiki beýany gazyň molekulalarynyň olaryň faza giňişliginde *f(t,q,p) paýlanyş funksiýasy* arkaly amala aşyrylýar. Umuman aýdylanda, ol haýsyda bolsa bir usul bilen molekulyň umumylaşdyrylan koordinatlarynyň (olaryň toplumy *q* arkaly bellenen) we olara degişli bolan umumylaşdyrylan impulslarynyň (olaryň toplumy *p* arkaly bellenen), stasionar däl halda bolsa goşmaça ýenede *t* wagtyň funksiýasy bolup durýar. $d\tau = dqdp$ - arkaly molekulanyň faza giňişliginiň göwrüminiň elementini belläliň; bu ýerde dq we dp degişlilikde ähli koordinatlarynyň we ähli impulslarynyň differensiallarynyň köpeltme hasyllaryny şertli belgileýärler. $fd\tau$ - köpeltme hasyly berlen $d\tau$ elementde ýerleşýän molekulalaryň orta sany bolup durýar, başgaça aýdylanda, berlen dq we dp interwallarda q we p bahalaryny eýeleýän molekullaryň sany.

Molekulyň öňe bolan hereketi hemişe kadaly bolýar. Ol onuň **r**=(x,y,z) - inersiýa merkeziniň koordinatlary we **p** impuls arkaly häsiýetlendirilýär. Biratomly gazda diňe öňe bolan hereket boýar. Köpatomly gazlarda molekulyň goşmaça aýlaw we yrgyldyly erkinlik derejeleri hem bar.

Molekullaryň gazlarda aýlaw hereketi hem hemişe diýen ýaly kadaly bolýar. Aýlaw hereketi molekulyň aýlaw hereketiniň **M** aýlaw momenti arkaly beýan edilýär. Ikiatomly molekul üçin bu ýeterlik bolýar. Şeýle molekuly **M** wektora perpendikulär bolan tekizlikde aýlanýan rotator hökmünde göz öňüne getirip bolýar. Hakyky fiziki meselelerde paýlanyşyk funksiýa bu tekizlikdäki molekulyň okunyň φ öwrülme burçyna bagly däl diýip hasap edip bolýar, diýmek görkezilen tekizlikde molekulyň ähli oriýentasiýalary deňähtimallykly bolýarlar. Bu netije molekulyň aýlaw hereketinde φ burçyň üýtgemeginiň çaltlygy bilen bagly bolýar. Köpatomly gazlarda paýlanyşyk funksiýa molekulyň oklarynyň **M** wektora görä fiksirlenen oriýentasiýasyny kesgitleýän burçlara görä hem bagly bolup bilýär.

Molekullaryň içindäki atomlaryň yrgyldyly hereketi hemişe kwantlanýar, şonuň üçin molekulyň yrgyldyly ýagdaýy degişli bolan kwant sanlar arkaly kesgitlenýär. Kadaly hallarda (gaty ýokary bolmadyk temperaturalarda) yrgyldylar oýalandyrylmadyk we molekul özüniň esasy (nolynjy) yrgyldy derejesinde ýerleşýär.

Indiden beýläk şu bapda Γ simwol arkaly paýlanyşyk funksiýanyň bagly bolan molekulyň bütewilik hereketiniň koordinatlaryndan we t wagtdan başga ähli üýtgeýänleriň toplumyny belgileniler.

$$f = f(t, q, p) = f(t, x, y, z, \Gamma)$$

$$d\tau = dqdp = dxdydzd\Gamma = dVd\Gamma$$

Γ ululyklaryň möhüm umumy häsiýeti bar. Olar hereketiň integrallary. Bir atomly gaz üçin Γ ululyklar: p_x, p_y, p_z, $d\Gamma = d^3 p$. Iki atomly gaz üçin Γ-p - lar we M - ler.

$$d\Gamma = dp_x dp_y dp_z dM_x dM_y dM_z = qnd^3 pM^2 d$$

$\int f(t, \vec{r}, \vec{\Gamma}) d\vec{\Gamma} = N(t, \vec{r})$ - gazyň bölejikleriniň dykyzlygy.

Jikme – jik deňagramlyk prinsipi.

Goý, bir molekulaň Γ ululyklary berlen d Γ aralykda ýerleşýän bolsunlar, beýleki molekulaň Γ ululyklary bolsa d Γ_1 aralykda ýerleşýän bolsunlar. Bu molekulalaryň çaknyşyklaryna seredeliň. Özi hem çaknyşygyň netijesinde bu molekulalar Γ ululyklary degişlilikde d Γ^1 we d Γ_1 aralyklarda eýeleýän bolsunlar, gysgça aýtmak üçin Γ we Γ_1 molekulalaryň Γ_1 $\Gamma_1 \rightarrow \Gamma_1^1 \Gamma_1^1$ geçýişli çaknyşyklar diýeris. Şeýle çaknyşyklaryň doly sanynyň wagt birligine we gazyň göwrüm birligine gatnaşygyny göwrüm birligindäki molekulalaryň sanynyň (bu san $f(t,\vec{r},\Gamma)d\Gamma$ deň) okuň hersiniň seredilýän kysymly çaknyşyga duçar bolmagynyň ähtimallygyna köpeltme hasyly görnüşinde beýan edip bolýar. Bu ähtimallyk islendik ýgdaýda Γ_1 molekulalaryň göwrüm birligindäki sanyna (bu san $f(t,\vec{r},\Gamma_1)d\Gamma_1$ deň) we molekulaň çaknyşykdan soňky ýagdaýdaky Γ ululyklarynyň $d\Gamma^1$ we $d\Gamma_1^1$ aralyklara proporsional. Şeýlelikde, wagt birliginde we göwrüm birliginde amala aşyrylýan bu çaknyşyklaryň sany

$$w(\Gamma^1,\Gamma_1^1,\Gamma,\Gamma_1)ff_1\,d\Gamma d\Gamma_1 d\Gamma^1 d\Gamma_1^1$$

deň.

Bu ýerde $f_1 \equiv f_1(t,\vec{r},\Gamma_1)$, w – käbir funksiýa. Belli bolşy ýaly, çaknyşyklaryň ähtimallygy mehanikanyň (kadaly ýa-da kwant) kanunlaryndan gelip çykýan möhüm häsiýeti eýeleýärler, bu wagtyň alamatynyň ters öwrülmesi bilen bagly. Goý, Γ^T – wagtyň tersine öwrülmesinde Γ – lerden alynýan ululyklaryň bahalary bolsunlar. Wagty tersine öwürme amal ähli impulslaryň we momentleriň alamatlaryny üýtgedýär. Şonlukda, eger-de $\Gamma=(\vec{P},\vec{M})$, onda $\Gamma T=(-\vec{p_1},-\vec{M})$. Şeýlelikde,

$$w(\Gamma_1^1,\Gamma^1,\Gamma,\Gamma_1)=\omega(\Gamma^T,\Gamma_1^T,\Gamma^{1T},\Gamma_1^{1T})$$

Şu gatnaşyk statistik deňagramly halda jikme-jik deňagramlyk prinsipiniň ýerine ýetirilmegini üpjün edýär. Bu prinsipe laýyklykda, deňagramly halda Γ_1 $\Gamma_1 \to \Gamma_1^1\Gamma_1^1$ geçişli çaknyşyklaryň sany Γ_1 $\Gamma_1 \to \Gamma_1^1\Gamma_1^1$ geçişli çaknyşyklaryň sanyna deň bolmaly.

$$w(\Gamma^1,\Gamma_1^1,\Gamma,\Gamma_1)f_0 f_{01}\,d\Gamma\, d\Gamma_1\, d\Gamma^1\, d\Gamma_1^1 = w(\Gamma^T,\Gamma_1^T,\Gamma^{1T},\Gamma_1^{1T})f$$

Bu ýerde f_0 – deňagramly (Bolsman) paýlanyşyk funksiýasy.

Gazlaryň kinetiki nazaryýetiniň esasy deňlemesi – Bolsmanyň kinetiki deňlemesi – bu $f(t, \vec{r}, \Gamma)$ paýlanyşyk funksiýasyny kesgitleýän deňlemesi bolup durýar. Eger-de molekulalaryň çaknyşyklary ýok diýip hasap edip bolsa, onda gazyň islendik molekulalaryny ýapyk aşakdaky ulgam hökmünde göz öňüne getirip bolardy we molekulalaryň paýlanyşyk funksiýasy üçin Linwilliň teoremasy ýerine ýetirilerdi:

$$\frac{df}{dt}=0$$

Bu ýerde doly önüm molekulaň hereketiniň deňlemeleriniň kesgitleýän faza traýektoriýasy boýunça differensirlenmegini aňladýar.

Molekulalaryň garyşygyna seredeliň:

$$\vec{\Gamma} \to \Gamma + d\Gamma \to \Gamma' + d\Gamma'$$

$$\Gamma' \text{-} \Gamma_1 + d\Gamma_1 \to \Gamma_1' + d\Gamma_1'$$

$$\Gamma_1 \Gamma_1 \to \Gamma_1' \Gamma_1'$$

$$\omega(\Gamma', \Gamma_1', \Gamma, \Gamma_1) f d\Gamma d\Gamma_1 d\Gamma' d\Gamma_1' = \frac{dN}{dtdv}$$

- gazyň göwrüminiň birligine we wagtyň birligine getirilen çaknyşyklaryň sany.

$$d\tau = \frac{\omega(\Gamma', \Gamma_1', \Gamma_1, \Gamma)}{\left|\vec{v} \text{-} \vec{v}_1\right|} d\Gamma' d\Gamma_1'$$

$$\omega(\Gamma', \Gamma_1', \Gamma, \Gamma_1) = \omega(\Gamma^T, \Gamma_1^T, \Gamma^{1T}, \Gamma_1^{1T})$$

Öz-özüne goýlan (berlen) gaz, islendik ýapyk ulgamy hökmünde deňagramly halyna geçmäge ymtylýar. Şeýlelikde, deňagramsyz paýlanyşyk funksiýanyň ewolýusiýasy gazyň entropiýasynyň ulalmagy bilen bilelikde amala aşyrylýar.

$S = \int f \ln \frac{e}{f} dVd\Gamma$ - deňagramsyz makroskopiki halda ýerleşýän hyýaly gazyň entropiýasy.

$$\frac{dS}{dt} = \int \frac{\partial}{\partial t}\left(f \ln \frac{e}{f} \right) dVdt = \int \left(\frac{\partial f}{\partial t} \ln \frac{e}{f} + f \frac{\partial}{\partial t}\left(\ln \right.\right.$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(f \ln \frac{e}{f} \right) = \frac{\partial f}{\partial t}(1\text{-}\ln f)\text{-}\frac{\partial}{\partial t}(\ln f) = \text{-}\ln f \frac{\partial f}{\partial t}$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{\vartheta}\vec{\nabla} f + \vec{F} \frac{\partial f}{\partial \vec{p}} = Stf$$ - Bolsmanyň kinetiki deňlemesi.

$$Stf = \int \omega^1 \left(f^1 f_1^1 - ff_1 \right) d\Gamma_1 d\Gamma^1 d\Gamma_1^1$$

$$\omega^1 = \omega\left(\Gamma^1, \Gamma_1^1, \Gamma_1, \Gamma\right)$$

$$\omega = \omega\left(\Gamma, \Gamma_1, \Gamma^1, \Gamma_1^1\right)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\int \ln f \left(-\vec{\vartheta}\vec{V} f - \vec{F}\frac{\partial f}{\partial \vec{p}} + Stf \right) dV d\Gamma$$

Başda diňe çaknyşyksyz bölümine seredeliň.

$$-\int \ln f \left(-\vec{\vartheta}\frac{\partial f}{\partial \vec{r}} - \vec{F}\frac{\partial f}{\partial \vec{p}} \right) dV d\Gamma$$

$$\left(\vec{\vartheta}\frac{\partial f}{\partial \vec{r}} + \vec{F}\frac{\partial f}{\partial \vec{p}} \right) \ln f = \left(\vec{\vartheta}\frac{\partial}{\partial \vec{r}} + \vec{F}\frac{\partial}{\partial \vec{p}} \right) \left(f \cdot \ln f \right) = \int \left(\vec{\vartheta}\frac{\partial}{\partial \vec{r}} + \vec{F}\frac{\partial}{\partial \vec{p}} \right.$$

$$\oint \vec{A} d\vec{S} = \int div \vec{A} dV$$

$$\vec{\vartheta} grad \vec{B} = div \vec{A}$$

$$\vec{\vartheta} \frac{\partial B}{\partial \vec{r}} = div \vec{A} = \vec{V} \vec{A}$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\int \ln f \cdot StfdVd\Gamma$$

Umumy ýagdaýda:

$$\int \varphi(\Gamma) Stfd\Gamma = \int \varphi\omega\left(\Gamma,\Gamma_1,\Gamma^1,\Gamma_1^1\right) f^1 f_1^1 d^{\varphi}\Gamma - \int \varphi\left(\Gamma^1\right)\omega\left(\Gamma^1,\Gamma_1^1,\Gamma,\Gamma_1\right)$$

$$\int \left(\varphi - \varphi^1\right)\omega\left(\Gamma,\Gamma_1,\Gamma^1,\Gamma_1^1\right) f^1 f_1^1 d^{\varphi}\Gamma$$

$$\int \left(\varphi_1 - \varphi_1^1\right)\omega^1 f^1 f_1^1 d^{\varphi}\Gamma$$

$$\frac{1}{2}\int \left(\varphi + \varphi_1 - \varphi^1 - \varphi_1^1\right)\omega^1 f^1 f_1^1 d\Gamma = \int \varphi(\Gamma) Stfd\Gamma$$

$$\varphi(\Gamma) \to \ln f$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{2}\int \omega^1 f^1 f_1^1 \left(\ln f + \ln f_1 - \ln f^1 - \ln f_1^1\right) d^{\varphi}\Gamma = \frac{1}{2}\int \omega^1 f^1 f_1^1 \ln \frac{f^1 f_1^1}{ff_1} d^{\varphi}\Gamma$$

$$\frac{f^1 f_1^1}{ff_1} = x$$

$$\int Stfd\Gamma = 0$$

$$\int Stfd\Gamma = \int \omega^1\left(f^1 f_1^1 - ff_1\right) d^{\varphi}\Gamma = 0$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{2}\int \omega^1 ff_1\left(x\ln x - x + 1\right) d^{\varphi}\Gamma dV$$

2. Gowşak birhili däl gazdaky kinetiki hadysalary

Bolsmanyň kinetiki deňlemesi:

$$\frac{df}{dt} = Stf$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{\vartheta}\vec{\nabla} f = \int \omega^1 \left(f^1 f_1^1 - ff_1 \right) d\Gamma_1 d\Gamma^1 d\Gamma_1^1$$

Bolsmanyň H-teoremasy:

$$S=\int f\ln\frac{e}{f}dVd\Gamma$$

$$\int Stfd\Gamma=\int\omega^{1}\left(f^{1}f_{1}^{1}\text{-}ff_{1}\right)d^{\varphi}\Gamma=0$$

$$\int\varphi\left(\Gamma\right)Stfd\Gamma=\frac{1}{2}\int\left(\varphi+\varphi_{1}\text{-}\varphi^{1}\text{-}\varphi_{1}^{1}\right)\omega^{1}f^{1}f_{1}^{1}d^{\varphi}\Gamma$$

$$\frac{dS}{dt}=\text{-}\int\ln fStfd\Gamma dV$$

$$\frac{dS}{dt}=\frac{1}{2}\int\omega^{1}f^{1}f_{1}^{1}\ln\frac{f^{1}f_{1}^{1}}{ff_{1}}d^{\varphi}\Gamma dV=\frac{1}{2}\int\omega^{1}ff_{1}x\ln xd^{\varphi}\Gamma dV$$

$$x=\frac{f^{1}f_{1}^{1}}{ff_{1}}$$

$$\frac{dS}{dt}=\frac{1}{2}\int\omega^{1}ff\left(x\ln x\text{-}x+1\right)d^{\varphi}\Gamma dV$$

$$\frac{dS}{dt}\geq 0$$

Gowşak birhili däl gazda dissipatiw (ýylylyk geçirijilik we şepbeşiklik) prosesslere seretmek üçin indiki ýakynlaşma geçmeli. Goý indi gazyň her böleginde paýlanyşyk funksiýasy lokal-deňagramly f_0 diýip hasap etmän, f f_0-dan gowşak tapawudy bar diýmeli.

$$f = f_0 + \delta f_1 \delta f = -\frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \chi(\Gamma) = \frac{1}{T} f_0 \chi$$

$$f_0(\Gamma) = c \cdot e^{\frac{-\varepsilon(\Gamma)}{T}}$$

f tapmak üçin indi $\chi(\Gamma)$ tapmaly. Bu funksiýa kinetiki deňlemäni kanagatlamaly we indiki şertleri hem kanagatlamaly:

$$\int f_0 \chi d\Gamma = 0 \qquad \int f_0 \chi \varepsilon d\Gamma = 0$$

$$\int f_0 \chi \vec{p} d\Gamma = 0$$

$\int f_0 d\Gamma$ -bölejikleriň sany

$\int \varepsilon f_0 d\Gamma$ -energiýa

$\int \vec{p} f_0 d\Gamma$ -impuls

f şu görnüşde kinetiki deňlemä salmaly:

$$Stf = \int \omega^1 \left(\left(f_0^1 + \frac{f_0^1}{T} \chi^1 \right) \left(f_{01}^1 + \frac{f_{01}^1}{T} \chi_1^1 \right) - \left(f_0 + \frac{f_0}{T} \chi \right) \left(f_{01} + \right.\right.$$

$$\int \omega^1 f_0 f_{01} \left(\frac{\chi_1^1}{T} + \frac{\chi^1}{T} - \frac{\chi_1}{T} - \frac{\chi}{T} \right)$$

$$\frac{f_0}{T} \int \omega^1 f_{01} \left(\chi_1^1 + \chi^1 - \chi - \chi_1 \right) d\Gamma d\Gamma^1 d\Gamma_1^1 = I(\chi)$$

$$Stf = \frac{f_0}{T} I(\chi)$$

Kinetiki deňlemäniň çep tarapy:

$$f_0 = e^{\frac{\mu - \varepsilon_{iç}}{T}} \qquad \left(\vec{V} = 0 \right)$$

$$\left(\vec{\vartheta} \to \vec{\vartheta} - \vec{V} \right) \quad \varepsilon(\Gamma) = \frac{m\vartheta^2}{2} + \varepsilon_{iç}$$

$$f_0 = e^{\frac{\mu - \varepsilon_{iç}}{T}} e^{-m\frac{\left(\vec{\vartheta} - \vec{V}\right)^2}{2T}} \qquad f_0 = f_0\left(\vec{V}, T, P\right)$$

$$\vec{V} = 0$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial T}\Big|_p = -S, \qquad \frac{\partial \mu}{\partial P}\Big|_T = \frac{1}{N},$$

$$\mu = w - Ts$$

Gazyň ýylylyk geçirijiligi.

$$\frac{df}{dt} = Stf \qquad f = f_0 + \delta f = f_0 + \frac{1}{T} f_0 \chi$$

$$f_0\left(\Gamma\right) = c \cdot e^{-\frac{\varepsilon(\Gamma)}{T}}$$

$$Stf = \frac{f_0}{T} \cdot I\left(\chi\right)$$

$$I\left(\chi\right) = \int \omega^1 f_{01}\left(\chi^1 + \chi_1^1 - \chi - \chi_1\right) d\Gamma_1 d\Gamma^1 d\Gamma_1$$

$f_0 = e^{\frac{\mu-\varepsilon(\Gamma)}{T}}$, μ - gazyň himiki potensialy.

$\vec{V}$ - gazyň akymynyň tizligi.

$$\varepsilon(\Gamma) = \frac{m\vartheta^2}{2} + \varepsilon_{ic}(\Gamma)$$

$$\vec{\vartheta} \to \vec{\vartheta} - \vec{V} \qquad f_0 = e^{\frac{\mu-\varepsilon_{ic}}{T}} e^{-\frac{m\left(\vec{\vartheta}-\vec{V}\right)^2}{2T}}$$

Şu aňlatmany wagt boýunça differensirlemeli. Soň $\vec{V} = 0$ diýip goýmaly.

$$\vec{V} = \vec{V}\left(t, \vec{r}\right) \qquad T = T\left(t, \vec{r}\right)$$

$$P = P\left(t, \vec{r}\right) \qquad \mu = \mu(T, P)$$

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} + \vec{\vartheta}\vec{\nabla} f \qquad f \to f_0$$

$$\frac{\partial f_0}{\partial t} = f_0\left[\left(\frac{\partial \mu}{\partial T}|_P \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \mu}{\partial P}|_T \frac{\partial P}{\partial t}\right)\frac{1}{T} - \frac{1}{T^2}\frac{\partial T}{\partial t}(\mu - \varepsilon)\right]$$

$$\frac{T}{f_0}\frac{\partial f_0}{\partial t} = \left[\frac{\partial \mu}{\partial T}|_P - \frac{\mu - \varepsilon(\Gamma)}{T}\right]\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial \mu}{\partial P}|_T \frac{\partial P}{\partial t} + m\vec{\vartheta}\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$$

$$\frac{df}{dt} = \frac{df}{dt} + \vec{\vartheta}\vec{\nabla} f \qquad f_0 = e^{\frac{\mu-\varepsilon}{T}}$$

$$\varepsilon = \frac{m\vartheta^2}{2} + \varepsilon_i$$

$$\frac{\partial\mu}{\partial T}\Big|_P = -S \qquad \frac{\partial\mu}{\partial P}\Big|_T = \frac{1}{N}$$

$$\mu = \omega - T \cdot s$$

Şeýlelikde,

$$\frac{T}{f_0}\vec{\vartheta}\vec{\nabla} f_0 = \frac{\varepsilon(\Gamma) - \omega}{T}\vec{\vartheta}\vec{\nabla} T + \frac{1}{N}\vec{\vartheta}\vec{\nabla} P + m\vartheta_\alpha \theta_\beta V_{\alpha\beta}$$

$$V_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial V_\alpha}{\partial x_\beta} + \frac{\partial V_\beta}{\partial x_\alpha}\right)$$

$$V_{\alpha\alpha} = div\vec{V} \qquad \omega - c_p T$$

$$\frac{\varepsilon(\Gamma) - c_p T}{T}\vec{\vartheta}\vec{\nabla} Tt\left[m\vartheta_\alpha \vartheta_\beta - \delta_{\alpha\beta}\frac{\varepsilon(\Gamma)}{C_\vartheta}\right]V_{\alpha\beta} = I(\chi)$$

Gazyň ýylylyk geçirijiligi:

$$\frac{\varepsilon\left(\Gamma\right)-C_pT}{T}\vec{\vartheta}\vec{\nabla}T=I\left(\chi\right)$$

$$\chi=\vec{g}\cdot\vec{\nabla}T,\vec{g}=\vec{g}\left(\Gamma\right)$$

$$I\left(\chi\right)=\int\omega^1 f_{01}\left(\chi^1+\chi_1^1-\chi-\chi_1\right)d\Gamma_1 d\Gamma^1 d\Gamma_1^1$$

$$\frac{\varepsilon\left(\Gamma\right)-C_pT}{T}\vec{\vartheta}=I\left(\vec{g}\right)$$

$$\int f_0\chi d\Gamma=0 \qquad \int\varepsilon f_0\chi d\Gamma=0$$

$$\int\vec{P}f_0\chi d\Gamma=0 \qquad \int f_0\vec{\vartheta}\vec{g}d\Gamma=0$$

$\vec{q}=\int\varepsilon\vec{\vartheta}fd\Gamma$ -energiýanyň akymynyň dykyzlygy.

$f=f_0+\frac{f_0}{T}$ - dissipatiw bölegi.

$$\vec{q} = \int \varepsilon \vec{\vartheta} \frac{f_0 \chi}{T} d\Gamma = \frac{1}{T} \int f_0 \varepsilon \vec{\vartheta} \left(\vec{g} \vec{\nabla} T \right) d\Gamma$$

$$q_\alpha = -\chi_{\alpha\beta} \frac{\partial T}{\partial x_\beta}$$

$$\chi = -\frac{1}{T} \int f_0 \varepsilon \vartheta_\alpha g_\beta d\Gamma$$

Izotrop ýagdaýda: $\chi_{\alpha\beta} = \chi \delta_{\alpha\beta}$,

$$\chi = \chi_{\alpha\beta} \big/ 3$$

$$\vec{q} = -\chi \vec{\nabla} T \qquad \chi = -\frac{1}{3T} \int f_0 \varepsilon \vec{\vartheta} \vec{g} d\Gamma$$

Gazyň şepbeşikligi

Gowşak birhilli däl gaz üçin kinetiki deňlemesi:

$$\frac{\varepsilon(\Gamma)-C_pT}{T}\vec{\vartheta}\vec{\nabla}T+\left[m\vartheta_\alpha\vartheta_\beta-\delta_{\alpha\beta}\frac{\varepsilon(\Gamma)}{C_\vartheta}\right]V_{\alpha\beta}=I(\chi)$$

$$I(\chi)=\int\omega^1 f_{01}\left(\chi^1+\chi_1^1-\chi-\chi_1\right)d\Gamma_1 d\Gamma^1 d\Gamma_1^1$$

$$\frac{\varepsilon(\Gamma)-C_pT}{T}\vec{\vartheta}\vec{\nabla}T=\left[\vec{g}\cdot\vec{\nabla}T\right]$$

$$\frac{\varepsilon(\Gamma)-C_pT}{T}\vec{\vartheta}=I\left(\vec{g}\right)$$

$\vec{q}=\int\varepsilon\vec{\vartheta}f_0 d\Gamma$ - energiýanyň akymynyň dykyzlygy.

$$\vec{q}=\int\varepsilon\vec{\vartheta}\frac{f_0}{T}\chi d\Gamma=\frac{1}{T}\int\varepsilon\vec{\vartheta}f_0\left(\vec{g}\cdot\vec{\nabla}T\right)d\Gamma$$

$$\vec{\vartheta} = \vartheta_\alpha \qquad \vec{g} = g_\beta \qquad \vec{\nabla} T = \frac{\partial T}{\partial x_\beta}$$

$$\vec{q} = \frac{1}{T} \int \varepsilon f_0 \vartheta_\alpha g_\beta \frac{\partial T}{\partial x_\beta} d\Gamma$$

$$\vec{q} = \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial x_\beta} \int \varepsilon f_0 \vartheta_\alpha g_\beta d\Gamma$$

$$\chi_{\alpha\beta} = -\frac{1}{T} \int \varepsilon f_0 \vartheta_\alpha g_\beta d\Gamma \qquad q_\alpha = -\chi_{\alpha\beta} \frac{\partial T}{\partial x_\beta}$$

Izotrop ýagdaý üçin:

$$\chi = \chi_{\alpha\alpha}/3 \qquad \vec{q} = -\chi \vec{\nabla} T$$

$$\chi = -\frac{1}{3T} \int f_0 \varepsilon \vec{\vartheta} \vec{g} d\Gamma$$

Indi şepbeşiklik üçin:

$$\left(m\vartheta_\alpha \vartheta_\beta - \delta_{\alpha\beta} \frac{\varepsilon(\Gamma)}{C_\vartheta} \right) V_{\alpha\beta} = I(\chi)$$

Şepbeşikligiň iki görnüşi bar: η we ξ.

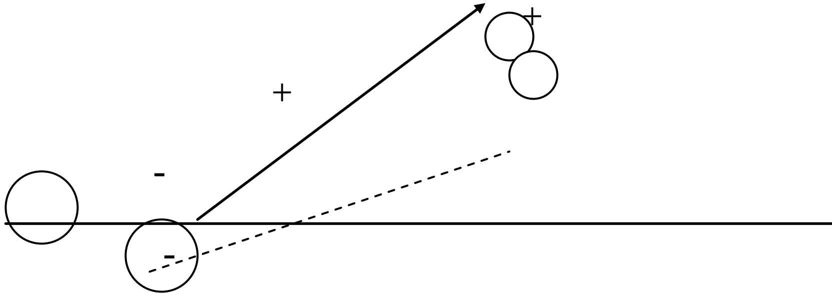
$$V_{\alpha\beta}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial V_{\alpha}}{\partial x_{\beta}}+\frac{\partial V_{\beta}}{\partial x_{\alpha}}\right)$$

$$V_{\alpha\alpha}=div\vec{V}$$

$$m\vartheta_{\alpha}\vartheta_{\beta}\left(V_{\alpha\beta}-\frac{1}{3}\delta_{\alpha\beta}div\vec{V}\right)+\left(\frac{m\vartheta^{2}}{2}-\frac{\varepsilon\left(\Gamma\right)}{C_{\vartheta}}\right)div\vec{V}=I\left(\right.$$

$$\Pi_{\alpha\beta}=P\delta_{\alpha\beta}+\rho V_{\alpha}V_{\beta}-\delta_{\alpha\beta}$$

$$\delta_{\alpha\beta}=2\left(V_{\alpha\beta}-\frac{1}{3}\delta_{\alpha\beta}div\vec{V}\right)+\xi\delta_{\alpha\beta}div\vec{V}$$



$$g_{\alpha\beta} = \left(\vartheta_\alpha \vartheta_\beta - \frac{1}{3} \delta_{\alpha\beta} \vartheta^2 \right) g(\vartheta)$$

$$\eta\alpha\beta\gamma\delta = -\frac{m}{T} \int f_0 \vartheta_\alpha \vartheta_\beta g_{\gamma\delta} d\,\Gamma$$

$$m\left(\vartheta_\alpha \vartheta_\beta - \frac{1}{3} \delta_{\alpha\beta} \vartheta^2 \right) V_{\alpha\beta} = I(\chi)$$

$$\chi = g_{\alpha\beta} \mathrm{V}_{\alpha\beta}$$

$$m\left(\vartheta_\alpha \vartheta_\beta - \frac{1}{3} \delta_{\alpha\beta} \vartheta^2 \right) = I\left(g_{\alpha\beta} \right)$$

Makroskopiki deňlemelere geçiş.

$$\eta\left(t, \vec{r}\right) = \int f\left(t, \vec{r}, \Gamma\right) d\Gamma$$

$$\vec{V} = \vec{\vartheta} = \frac{1}{n} \int \vec{\vartheta} f d\Gamma$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \vec{\vartheta} \vec{\nabla} f = \frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_\alpha} (\vartheta_\alpha f) = Stf$$

$$\int Stf d\Gamma = 0 \qquad \int \varepsilon Stf d\Gamma = 0$$

$$\int \vec{P} Stf d\Gamma = 0$$

Almaly:
$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+div\rho\vec{V}=0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho\vartheta_{\alpha}+\frac{\partial\eta_{\alpha\beta}}{\partial x_{\alpha\beta}}=0 \quad \frac{\partial}{\partial t}n\bar{\varepsilon}+div\vec{q}=0$$

Ýeňil gazyň agyr gazdaky diffuziýasy

Garyndynyň iki sany düzüjileriň bölejikleriň dykyzlygy n_1 we n_2. konsentrasiýa $c=n_1/n$, $n=n_1+n_2$.

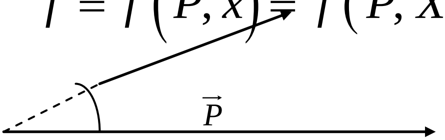
$$PV=\frac{m}{\mu}RT \qquad \frac{m}{V}=\frac{P\mu}{RT} \qquad \frac{P}{T}=n$$

$$n=N\cdot m_0 \qquad \mu=N_a\cdot m_0$$

$$\frac{Nm_0}{V}=\frac{PN_Am_0}{kN_AT} \qquad n=\frac{P}{kT}$$

Gazyň basyşy göwrüm boýunça hemişelik, temperatura bilen konsentrasiýa x oky boýunça üýtgeýär. Agyr molekulalaryň orta tizligi ýeňil molekulalaryň orta tizliginden kiçi, olary ýakynlaşdyrmakda gozganmaýan hasap edip bolýar. Goý garyndyda ýeňil gazyň konsentrasiýasy az bolsun, şunlukda olar öz-özleri bilen juda az çaknyşýarlar, esasan ýeňil molekulalar bilen agyr molekulalar çaknyşýarlar diýip bolar. Ýeňil bölejikleriň paýlanyş funksiýasy $f = f\left(\vec{P}, x\right)$.

$$f = f\left(\vec{P}, x\right) = f\left(P, X, \theta\right)$$



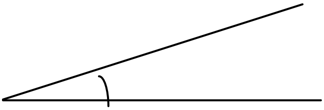
θ $\qquad$ $\vec{P} \to \vec{P}^1$,

$\vec{P} = m\vec{\vartheta}$, $\quad \vec{P}^1 = m\vec{\vartheta}^1$

X

Ýeňil bölejigiň çaknyşmaga sezewar bolmagynyň ähtimallygy $n^2 d\tau$, $\qquad d\tau = (F, \alpha) P\,\Omega^1$ - çaknyşyklaryň (birlik ýolda) kesimi.

Wagt birlige düşýän çaknyşygyň ähtimallygy $n_2 d\tau \cdot \vartheta$.



$$f d\vec{P} = n_1 = f(P,\theta,X)P^2 dP d\Omega$$

$$\vec{P} + d\vec{P}$$

$$f(P,\theta,X)P^2 dP d\Omega \cdot n_2 \vartheta F(P,\alpha) d\Omega^1$$

$\vec{P} \to \overrightarrow{p^1}$ üýtgedýän bölejikleriň sany:

$\vec{P}$

$$d^3p \int n_2 \vartheta F(P,\alpha) \cdot f(P,\theta,X) d\Omega^1$$

$\vec{P}^1 \to \vec{P}$ üýtgedýän bölejikleriň sany:

$$d^3p^1 \int n_2 \vartheta^1 F(P_1^1 \alpha) f(p_1^1,\theta,X) d\Omega$$

$$d^3p \int n_2 \vartheta f(p,\theta^1,x) F(p,\alpha) d\Omega^1$$

Şeýlelikde d^3p göwrümde bölejikleriň sanynyň üýtgemegi

$$d^3pn_2\vartheta\int F(p,\alpha)[f(p,\theta^1,x)\text{-}f(p,\theta,x)d\Omega^1]$$

Başga tarapdan bu üýtgeme wagt boýunça doly önüme deň bolmaly:

$$d^3p\frac{df}{dt} = d^3p\vec{\vartheta}\vec{\nabla}f = d^3p\frac{\partial f}{\partial x}\vartheta\cos\theta$$

Bu iki aňlatmany biri-birine deňläp ahyrky kinetiki almaly:

$$\vartheta\cos\theta\frac{\partial f}{\partial x} = n_2\vartheta\int F(p,\alpha)[f(p,\theta^1,x)\text{-}f(p,\theta,\alpha)]d\Omega^1 = \mathrm{Stf}$$

$f = f_0(p,x) + \delta f(p,\theta,x)$-görnüşde gözläp bolýar.

$$\delta f = \cos\theta\cdot g(p,x)$$

$$Stf = gn_2\vartheta\int F(p,\alpha)(\cos\theta^1\text{-}\cos\theta)d\Omega^1$$

$$\vartheta\cos\theta\frac{\partial f_0}{\partial x} = n_2\vartheta\int F(p,\alpha)\,[\cos\theta^1\text{-}\cos\theta]g(p,x)d$$

Bu integraly az-maz ýönekeýleşdirip bolýar. Goý, burçlary hasaplamak üçin polýar oky hökmünde $\vec{P}$ impulsyň ugruny alaly. Onda goý, φ *we* φ^1- X oky we $\vec{P}^1$ impulsyň polýar oka görä azimutlary bolsun. Onda:

$$\cos\theta^1 = \cos\theta\cos\alpha + \sin\theta\sin\alpha\cos(\varphi\text{-}\varphi^1$$

$d\Omega^1 = \sin\alpha d\alpha d\varphi^1$ α-$\vec{p}^1$ üçin polýar burç bolýar. Onda:

$$Stf = gn_2\vartheta\int F(p,\alpha)(\cos\theta^1\text{-}\cos\theta)d\Omega^1$$
$$= gn_2\vartheta\int F(p,\alpha)(\cos\theta\cos\alpha + \sin\theta\sin\alpha\cos(\varphi\text{-}\varphi^1)\text{-}\cos$$

$$Stf = \text{-}n_2\sigma_t(p)\vartheta g\cos\theta = \text{-}n_2\sigma_t(p)\vartheta\delta f$$

$\sigma_t = 2n\int F(p,\alpha)(1\text{-}\cos\alpha)\sin\alpha\, d\alpha$ - çaknyşyklaryň ulag kesimi.

$$g(p,x) = -\frac{1}{n_2\sigma_t}\frac{\partial f_0}{\partial x}$$

$$\vartheta \cos\theta \frac{\partial f_0}{\partial x} = -n_2\sigma_t(p)\vartheta\delta f$$

$I = \int f\vec{\vartheta} d^3 p$ -diffuzion akym.

$$i = \int \cos\theta f \vartheta d^3 p = \int \cos^2\theta g \vartheta d^3 p$$

$$i = \int \cos^2\theta \left(-\frac{1}{n_2\sigma_t(p)}\frac{\partial f_0}{\partial x} \right) \vartheta d^3 p = -\frac{1}{n_2}\frac{\partial}{\partial x}\int \frac{\cos^2\theta \vartheta f_0}{\sigma_t(p)} d^3 p = -\frac{1}{3n_2}\frac{\partial}{\partial x}\int \frac{f_0 \vartheta}{\sigma_t} d^3$$

Tejribe maglumatlardan:

$$i = -ND\left(\nabla C + \frac{kT}{T}\nabla T \right)$$

D-diffuziýa koefisiýenti
D_T-DK_T - termodiffuziýa koefisiýenti
DK_T - termodiffuziýa gatnaşygy.

$$D = \frac{T}{3P} < \vartheta / \sigma_t >$$

$$k_T = CT \frac{\partial}{\partial T} \ln \frac{< \vartheta / \sigma_t >}{T}$$

$$i = -\frac{1}{3n_2} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ M_1 < \frac{\vartheta}{\sigma_t} > \right\}$$

$$n_1 = \int f d^3 p$$

$$C = \frac{n_1}{n} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$n_2 = n = \frac{P}{T}$$

$$i = -\frac{T}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{C}{T} < \frac{\vartheta}{\sigma_t} > \right\} = -\frac{1}{3} < \frac{\vartheta}{\sigma_t} > \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{CT}{3} \frac{\partial}{\partial T} \left[\frac{1}{T} < \frac{\vartheta}{\sigma_t} > \right]$$

Agyr gazyň ýeňil gazda diffuziýasy.

Eýnşteýniň gatnaşygy:

D=bT, b - bölejikleriň hereketliligi.

$$\vec{V} = b \cdot \vec{f}$$

$$f_0 = \frac{n_1}{\left(2\pi m_1 T\right)^{3/2}} e^{-\frac{m_1 \vartheta^2}{2T}}$$

ϑ - ýeňil bölejikleriň tizligi, V - agyr bölejikleriň tizligi.

$$f_0\left(\vec{\vartheta}+\vec{V}\right) = f_0\left(\vartheta\right)\cdot\left(1-\frac{m_1\vec{\vartheta}\vec{V}}{T}\right)$$

$$\vec{f}_V = m_1 \int f_0\left(\vec{\vartheta}+\vec{V}\right)\vartheta\vec{\vartheta}\sigma_t d^3P$$

$$\vec{f}_V = -\frac{m_1^2}{T}\int f_0\left(\vartheta\right)\left(\vec{V}\vec{\vartheta}\right)\vec{\vartheta}\vartheta\sigma_t d^3P$$

$$\sigma_t = \left(1-\cos\alpha\right)d\sigma$$

$f_0\left(\vartheta\right)$ - boýunça integrirleme nol berýär. $\vec{\vartheta}$ ugurlar boýunça ortalaşdyrsak:

$$\vec{f}_k = -\frac{m_1^2}{3T}\vec{V}\int f_0\left(\vartheta\right)\sigma_t\vartheta^3 d^3P = -n_1\frac{m_1^2}{3T}\vec{V} < \sigma_t\vartheta^3$$

$$n_1 \ll n_2 \Rightarrow n_1 \ll n = \frac{P}{T}$$

$$\vec{f}_V = -\frac{m_1 P}{3T^2} < \sigma_t\vartheta^3 > \vec{V}$$

$$\vec{f} = \vec{f}_V \Rightarrow \vec{V} = bT$$

$$\vec{V} = b\vec{f}$$

$$D = bT = \frac{3T^3}{m_1^2 P < \sigma_t\vartheta^3 >}$$

$$D = bT\ ,$$

D – agyr bölejikleriň diffuziýa koeffisiýenti.
b – agyr bölejikleriň hereketliligi.

$$\vec{\vartheta} = b\vec{f}$$

$\vec{\vartheta}$ - agyr bölejigiň orta tizligi.

Ýeňil bölejikleriň paýlanyşygy Makswell paýlanyşygy bolup durýar.

,

m_1 - ýeňil bölejigiň massasy.

$\vec{\vartheta}$ tizlik bilen hereket edýän agyr bölejik bilen bagly bolan koordinatalar ulgamyna geçmeli. $\vec{\vartheta}$ bu ulgamda ýeňil bölejigiň tizligi. Onda bu täze ulgamda

$$f_0 = f_0\left(\vec{\vartheta} + \vec{v}\right) = \frac{n_1}{\left(2nm_1T\right)^{3/2}} e^{-\frac{m_1\left(\vec{\vartheta}+\vec{v}\right)^2}{2T} - \frac{m_1(}{}}$$

$$= f_0\left(\vec{\vartheta}\right) \cdot e^{-\frac{m\nu^2}{2T} - \frac{m_1\vec{\vartheta}\vec{v}}{T}} \approx f_0\left(\vec{\vartheta}\right) \cdot e^{-\frac{m_1\vec{\vartheta}\vec{v}}{T}} \approx$$

$$\nu << \vartheta \Rightarrow$$

$$e^{\alpha} = 1 + \alpha$$

Garşylyk güýç $\vec{f}_V$ - wagt birliginde agyr bölejik bilen çaknyşýan ýeňil bölejikleriň berýän doly impulsy hökmünde hasaplap bolýar.

$$\Delta\vec{P} = m_1\vec{\vartheta}(1-\cos\alpha)$$

$$\alpha = 2\beta$$

$$n - 2\beta = O$$

$$\vec{f}_V = m_1\int f_0(\vec{\vartheta}+\vec{v})\vartheta\cdot\underbrace{\vec{\vartheta}(1-\cos\alpha)d\sigma}_{\sigma_t}d^3P$$

$$\mu B < T$$

$$\vec{\mu} = \gamma\vec{M}$$

$\vec{\mu}$ - magnit momenti, $\vec{M}$ - aýlaw momenti.

$$\vec{f}_V = m_1 \int \underbrace{f_0\left(\vec{\vartheta} + \vec{v}\right)}_{f_0(\vartheta)\left(1 - \frac{m_1 \vec{\vartheta}\vec{v}}{T}\right)} \cdot\vartheta \cdot \vec{\vartheta} \sigma_t d^3 P$$

$$\vec{f}_V = m_1 \int f_0(\vartheta)\left(1 - \frac{m_1 \vec{\vartheta}\vec{v}}{T}\right) \cdot\vartheta \cdot \vec{\vartheta} \sigma_t d^3 P$$

$$\vec{f}_V = -\frac{m_1^{\;2}}{T} \int f_0(\vartheta)\left(\vec{v}\vec{\vartheta}\right) \cdot\vec{\vartheta}\vartheta \sigma_t d^3 P$$

$\vec{\vartheta}$ tizligiň ugry boýunça orta bahasyny alyp

$$\vec{f}_V = -\frac{m_1^{\;2}\vec{V}}{3T} \int f_0(\vartheta) \cdot \sigma + \vartheta^3 d^3 P = -\frac{m_1^{\;2}\vec{V}}{3T} n_1 < \sigma_t \vartheta^3 >$$

$$n_1 >> n_2 = 0 \quad n_1 \approx n = \frac{P}{T}$$

$$\vec{f}_V = -\frac{m_1^{\;2}\vec{V}}{3T^2} P < \sigma_t \vartheta^3 > = f = \frac{V}{b} \Rightarrow D = bT =$$

$$= \frac{3T^3}{m_1^{\;2} P < \sigma_t \vartheta^3 >}$$

Daşky magnit meýdanda ýerleşen gazda kinetiki hadysalary.

$$\vec{\mu} = \gamma\vec{M} \qquad\qquad \alpha\sigma\mu_B = \gamma M$$

$$\mu = \alpha\sigma\mu_B$$

$$\gamma = \frac{\alpha\sigma}{M}\mu_B$$

$\vec{B}$ magnit meýdanda molekula $\left[\vec{\mu}\vec{B}\right]$ güýjiň momenti täsir edýär.

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \left[\vec{\mu}\vec{B}\right] = -\gamma\left[\vec{B}\vec{M}\right]$$

$$\frac{df}{dt} = \frac{df}{dt} + \vec{\vartheta}\frac{\partial f}{\partial\vec{V}} + \gamma\left[\vec{M}\vec{B}\right]\frac{\partial f}{\partial\vec{M}} = Stf$$

$\vec{M}$ - aýlaw momenti,

$\vec{\mu}$ - magnit momenti.

$$f = f\left(\vec{V}, \vec{P}, t, \vec{M}\right)$$

$$\frac{df}{dt} = \frac{df}{dt} + \vec{\vartheta}\frac{\partial f}{\partial \vec{V}} + \frac{\partial f}{\partial \vec{M}} \cdot \frac{\partial \vec{M}}{\partial t}$$

$$\frac{df}{dt} = \frac{df}{dt} + \vec{\vartheta}\frac{\partial f}{\partial \vec{V}} + \frac{\partial f}{\partial \vec{M}} \cdot \gamma$$

$$f = f_0\left(1 + \frac{\chi}{T}\right) = f_0 + \frac{1}{T} f_0 \chi$$

Ýylylyk geçirijilik üçin:

$$\frac{\varepsilon(r) - c_p T}{T}\vec{\vartheta}T + \left[m\vartheta_\alpha\vartheta_\beta - \delta_{\alpha\beta}\frac{\varepsilon(r)}{cv}\right]V_{\alpha\beta} = I($$

$$I(\chi) = \int w' f_{01}\left(\chi' + \chi_1' - \chi - \chi_1\right) dr_1 dr' dr_1'$$

$$\frac{\partial f_0}{\partial \vec{M}} = 0,$$ sebäbi:

$$f_0 = f_0(\varepsilon(M))$$

$$\frac{\partial f_0}{\partial \vec{M}} = \frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial \vec{M}} = \Omega$$ -

molekulanyň burç tizligi.

$$\partial\left(\left[\vec{M}\vec{B}\right]\vec{\Omega}\right)\frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \Rightarrow 0$$

$$\vec{M} \parallel \vec{B}$$

$$\frac{\varepsilon(r) - c_p T}{T}\vec{\vartheta}\vec{\nabla}T = -\gamma\left[\vec{M}\vec{B}\right]\frac{\partial \chi}{\partial \vec{M}} + I(\chi)$$

$\chi = \vec{g} \cdot \vec{\nabla} T$ - görnüşde gözlemeli.

$$q_\alpha = -æ_{\alpha\beta}\frac{\partial T}{\partial x\beta}$$

$$æ_{\alpha\beta} = -\frac{1}{T}\int f_0 \varepsilon \vartheta_\alpha g_\beta dr$$

Paýlanyşyk funksiýanyň fluktuasiýalary

Deňagramly gatda paýlanyşyk funksiýanyň fluktuasiýasy.

Kinetiki deňleme arkaly kesgitlenýän paýlanyşyk funksiýa $\bar{f}Vd^3xd\Gamma$ faza göwrüminiň elementinde ýerleşýän molekulalaryň diňe orta bahasyny berýär; statistiki taýdan deňagramly gazyň $\bar{f}(\Gamma)$ funksiýa – bu wagta we (eger-de daşky meýdan ýok bolsa) $\vec{r}$ koordinatalara bagly däl bolan Bolsmanyň paýlanşyk funksiýasy Şeýlelikde gatyň bölejikleriň hereketiniň takyk deňlemeleri boýunça hereketiniň wagtyň dowamynda takyk mikraskopiki paýlanşyk funksiýanyň üýtgemegi bilen onuň fluktuasiýalary barada sorag ýüze çykýar. Fluktuasiýalaryň korreliasion funksiýa ýa-da gysgaça korrelýator diýip,

$$< \delta f(t_1, \boldsymbol{r}_1, \Gamma_1,)\delta f(t_2, \boldsymbol{r}_2, \Gamma_2) > \text{ diýilýär.}$$

Bu ýerde $\delta f = f - \bar{f}$. Deňagramly gazda bu funksiýa diňe t_1 we t_2 wagtlaryň tapawudyna bagly bolýar. $t = t_1 - t_2$: ortalaşma t_1 ýa-da t_2 pursatlaryň biri boýunça ýerine ýetirilýär, olaryň tapawudy bolsa fiksirlenen bolýar. Gaz birmeňzeş bolany üçin korrelýatora $\boldsymbol{r_1}$we $\boldsymbol{r_2}$ nokatlaryň koordinatlary $\boldsymbol{r} = \boldsymbol{r_1} - \boldsymbol{r_2}$ tapawudy görnüşinde hem girýärler.

Şeýlelikde, şertli ýagdaýda $\boldsymbol{t_2}$we $\boldsymbol{r_2}$ nola deň diýip goýup bolýar. onda korrelýatory indiki görnüşde beýan edip bolýar:

$$< \delta f(\mathrm{t}, \boldsymbol{r}, \Gamma_1,)\delta f(O, O, \Gamma) >$$

Eger-de şu funksiýa belli bolsa, onda integrirläp bölejikleriň sanynyň dykyzlygynyň korrelýatoryny hem tapyp bolýar:

$$< \delta N(\mathrm{t}, \boldsymbol{r})\, \delta N(O, O) >= \int < \delta f(\mathrm{t}, \boldsymbol{r}, \Gamma_1,)\delta f(O, O, \Gamma_2) d\Gamma_1\, d\Gamma_2$$

Erkin ylgaw ýolunyň uzynlygyna $\boldsymbol{e}$ görä uly bolan aralyklar üçin dykyzlygyň korrelýatoryny fluktuasiýalaryň gidrodinamiki nazaryýetiniň kömegi bilen hasaplap bolýar. ondan kiçi aralyklar üçin $\leq e$ kinetiki derňew geçirmeklik zerur bolýar.

$$< \delta f(\mathrm{t}, \boldsymbol{r}, \Gamma_1,)\delta f(O, O, \Gamma) >=< \delta f(-\mathrm{t}, -\boldsymbol{r}, \Gamma_1,)\delta f(O, O, \Gamma) >$$

Ulgamyň deňagramly halynyň wagty tersine öwrülme amala görä simmetriýasyny korrelýasion funksiýa hem eýeleýär.

t=0 bolan ýagdaýda korrelýasion funksiýa faza giňişlikdäki dürli nokatlardaky ýöne wagtyň şol bir pursatyndaky funksiýalary baglanyşdyrýar. Emma birwagtdaky fluktuasiýalaryň arasyndaky korrelýasiýalar molekulýar güýçleriň täsiriniň radiusynyň ululygyna deňeçeräk bolan aralyklara diňe ýaýraýarlar. Şu seredilýän nazaryýetde deňagramly halda beýle aralyklar nola deň hasap edilýär we şonuň üçin birwagtdaky korrelýator nola hem öwrülýär. Deňagramsyz halda birwagtdaky fluktuasiýalar hem korrelirlenen bolýarlar.

Hyýaly deňagramly gazda paýlanyşyk funksiýanyň fluktuasiýasynyň orta kwadraty funksiýanyň özüniň orta bahasy bilen gabat gelýär. Şunlukda,

$$< \delta f(t, \boldsymbol{r}, \Gamma_1,) \delta f(O, O, \Gamma_2) >= \bar{f}(\Gamma_1) \delta(\boldsymbol{r}) \delta(\Gamma_1 - \Gamma_2)$$

Dürli nokatlardaky fluktuasiýalaryň arasyndaky bir wagtdaky däl korrelýasiýa molekulýar ölçegler nola deň hasap edýän nazaryýetde bar.

Goý, $x_a(t)$ – fluktirleýän ululyklar bolsunlar (olaryň orta bahalary nola deň). Eger-de ulgamyň x_a ululyklaryň bahalary orta fluktuasiýalaryň çäklerinden çykýan (ýöne şonda-da kiçi bolan) bolan deňagramsyz halda ýerleşýän bolsa, onda ulgamyň deňagramly halyna relaksasiýasy çatykly deňlemeler arkaly beýan edilýär:

$$x_a = -\sum_b x_{ab} x_b$$

X_{ab}-hemişeki koefisiýentler. Onda

$$\frac{d}{dt} < x_a(t) x_c(0) >= -\sum_b x_{ab} < x_b(t) x_c(0) > , \quad t > 0$$

Bu deňlemeleri t>0 ýagdaý üçin çözüp t<0 ýagdaý üçin funksiýalaryň bahalaryny alarys simmetriýanyň häsiýetini ulanyp:

$$< x_a(t) x_b(0) >=< x_b(-t) x_a(0) >$$

Seredilýän ýagdaý üçin çyzykly deňlemeleri hökmünde f deňagramly paýlanyşyk funksiýa kiçi goşundy bolan δf funksiýa üçin Bolsmanyň çyzyklaşdyrylan deňlemesi ulanylýar.

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{\vartheta}_1 \frac{\partial}{\partial \vec{r}} - \hat{I}_1\right) < \delta f(t, \vec{r}, \Gamma_1) \delta f(0,0,\Gamma_2) >=$$

$$\hat{I}_1 g(\Gamma_1) = \Gamma_1 \int \omega(\Gamma_1, \Gamma, \Gamma_1^1 \Gamma^1) [\bar{f}_1^1 g_1^1 + \bar{f}^1 g^1 - \bar{f}_2 g_2 -$$

Deňagramsyz gazda paýlanyşyk funksiýanyň fluktuasiýalary.

Goý, gaz stasionar emma deňagramsyz halda ýerleşýn bolsun. Onuň $\bar{f}(\vec{r}, \Gamma)$ paýlanyşyk funksiýasy

$$\vec{\vartheta} \frac{\partial}{\partial \vec{r}} = St \bar{f}$$

Kinetiki deňlemäni kanagatlaýan bolsun. Stasionar deňagramsyz hal gazda daşky täsirler arkaly deň üpjün edilýär. $f(t, \vec{r}, \Gamma)$ paýlanyşyk funksiýanyň $\bar{f}(\vec{r}, \Gamma)$ funksiýa görä fluktuasiýalaryny hasap etmeli.

$$< \delta f_1(t) \delta f_2(t) >=< \delta f_2(-t) \delta f_1($$

Bu ýerde,

$$f_1(t) \equiv f(t, \vec{r}_1, \Gamma_1), \quad f_2(0) \equiv f(0, \vec{r}_2, \Gamma_2)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial} + \vec{\vartheta}_1 \frac{\partial}{\partial \vec{r}_1} - \hat{I}_1\right) < \delta f_1(t) \delta f_2(0) >= 0$$

4. Diffuzion ýakynlaşma

Paýlanyşyk funksiýanyň argumentlerine girýän fiziki ululyklaryň her çaknyşyk elementar amalda orta üýtgemeleri olaryň häsiýetlendiriji bahalary bilen deňeşdirilende az bolan prosesler kinetiki hadysalarda uly mukdaryny eýeleýärler. Şeýle prosesleriň relansasiýa wagtlary elementar anktlara görä uly, şu manyda bu proseslere haýal diýip bolýar. Beýle meseleleriň tipiki mysaly bolup agyr gabyň ýeňil gazda azajyk garyndysynyň impulslar boýunça relansasiýa meselesi durýar.

Goý $w(\vec{P}, \vec{q})d^3q$ - wagt birligine getirilen ýeňil bölejik bilen çaknyşykda agyr bölejigiň impulsynyň $\vec{P} \rightarrow \vec{P} + \vec{q}$ üýtgemesiniň ähtimallygy bolsun. Onda $f(t, \vec{P})$ funksiýa üçin kinetiki deňleme şeýle ýazylýar

$$\frac{\partial f\left(t,\vec{P}\right)}{\partial t}=\int\left[w\left(\vec{P}+\vec{q},\vec{q}\right)f\left(t,\vec{P}+\vec{q}\right)-w\right.$$

$$q<<P^3\Rightarrow w\left(\vec{P}+\vec{q},\vec{q}\right)f\left(t,\vec{P}+\vec{q}\right)\approx w$$

$$+\vec{q}\,\frac{\partial}{\partial\vec{P}}w\left(\vec{P},\vec{q}\right)f\left(t,\vec{P}\right)+\frac{1}{2}q_\alpha q_\beta\,\frac{\partial^2 w\left(\vec{P},\right.}{\partial\vec{P}_\alpha\partial\vec{P}}$$

Netijede kinetiki deňleme indiki görnüşi eýeleýär.

$$\frac{\partial f}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial P_\alpha}\left[\tilde{A}_\alpha f+\frac{\partial}{\partial P_\beta}\left(B_{\alpha\beta}f\right)\right]$$

$\longleftarrow$ Fokker – Plankyň kinetiki deňlemesi.

$$\tilde{A}_\alpha = \int q_\alpha w\left(\vec{P},\vec{q}\right) d^3 q$$

$$B_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}\int q_\alpha q_\beta w\left(\vec{P},\vec{q}\right) d^3 q$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \int \left[\vec{q}\,\frac{\partial}{\partial \vec{P}} w\left(\vec{P},\vec{q}\right) f + \frac{1}{2} q_\alpha q_\beta \frac{\partial w\left(\vec{P},\vec{q}_1\right)}{\partial P_\alpha \partial P_\beta} f \right] d^3 q$$

$$q_\alpha \frac{\partial}{\partial P_\alpha} wf$$

$$\tilde{A}_\alpha = \frac{\sum q_\alpha}{\delta t}, B_{\alpha\beta} = \frac{\sum q_\alpha q_\beta}{\delta t}$$

$$\frac{\partial}{\partial P_\alpha}\left[\tilde{A}_\alpha f + \frac{\partial}{\partial P_\beta}\left(B_{\alpha\beta} f\right)\right] = -\frac{\partial S_\alpha}{\partial P_\alpha}$$

$$S_\alpha = -\tilde{A}_\alpha f - \frac{\partial}{\partial P_\beta}\left(B_{\alpha\beta} f\right) = -\tilde{A}_\alpha f - B_{\alpha\beta}\frac{\partial f}{\partial P_\beta}$$

$$A_\alpha = \tilde{A}_\alpha + \frac{\partial B_{\alpha\beta}}{\partial P_\beta}$$

Kinetiki deňlemedäki koeffisiýentler çaknyşyklaryň orta häsiýetnamalary üsti beýan edilýär, bu manyda olaryň hasaplanyşy mehaniki mesele bolup durýar. Hakykatda, A_α we $B_{\alpha\beta}$ koefisiýentleri aýratyn hasaplamakda zerurlygy ýok, olary biri-biri arkaly aňladyp bolýar. Eger-de statistiki deňagramlykda akymyň nola öwrülýän şerti alsak. Bu ýagdaýda deňagramly paýlanyşyk funksiýa

$$f = \mathrm{const} \cdot e^{-\vec{P}^2/2MT}$$

Bu ýerde M-agyr gazyň bölejikleriň massasy, T-esasy (ýeňil) gazyň temperaturasy. Şu aňlatmany S=0 deňlemä goýsak

$$MTA_\alpha = B_{\alpha\beta} P_\beta$$

Şeýlelikde,

$$\frac{\partial f(t,\vec{P})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial P_\alpha}\left[B_{\alpha\beta}\left(\frac{P_\beta}{MT} f + \frac{\partial f}{\partial P_\beta}\right)\right]$$

Gowşak ionižirlenen gaz daşky elektrik meýdanda.

Birmeňzeş $\vec{E}$ elektrik meýdanda ýerleşýän ionizirlenen gaza seredeliň. Meýdan gazdaky erkin elektronlaryň deňagramly paýlanşygy bozýar we onda elektrik akym peýda bolýar. Elektron paýlanşygy kesgitleýän kinetiki deňlemäni tapmaly.

Ionizirlemegiň gowşaklygy gazdaky elektronlaryň (we ionlaryň) konsentrasiýasy az bolandygyny aňladýar. Şonuň üçin esasy orny elektronlaryň neýtral molekulalar bilen çaknyşyklary eýeleýärler ; elektronlaryň (we ionlaryň) biri-biri bilen çaknyşyklary ýok diýip hasap edip bolýar. Elektronlaryň m we molekulalaryň H massalarynyň arasynda örän uly tapawudy bar bolany üçin elektronlaryň orta tizligi molekulalaryň orta tizliginden uly. Şol sebäpli hem çaknyşyklarda elektronyň impulsy ugry boýunça güýçli üýtgeýär. Emma absolýut bahasy boýunça sähelçe üýtgeýär.

$f(t,P,Ö)$ funksiýa üçin kinetiki deňleme indiki görnüşi eýeleýär:

$$\frac{\partial f}{\partial t} - e\vec{E}\frac{\partial f}{\partial \vec{P}} = -\frac{1}{P^2}\frac{\partial}{\partial P}P^2 S + N\vartheta \int f(t, P, \theta') - f$$

Bu ýerde

$$S = -B\left(\frac{\vartheta}{T} f + \frac{\partial f}{\partial P}\right)$$

$$B = \frac{\sum(\Delta P)^2}{2\delta t}$$

N-molekulalaryň sanynyň dykyzlygy.

Meýdanyň ugry boýunça simmetriýa bar bolany üçin paýlanşyk funksiýa wagtdan başga diňe iki ululyga bagly bolýar: impulsyň absolýut ululygyna P we impulsyň $\vec{P} = m\vec{\vartheta}$

we $\vec{E}$ elektrik meýdanyň ugurlarynyň arasyndaky θ burça.

B ululygy hasaplamak üçin

$$\left(\vec{\vartheta}-\vec{V}\right)^2=\left(\vec{\vartheta'}-\vec{V'}\right)^2$$

deňlemäni ulanmaly.

Bu deňleme maýyşgak çaknyşykdaky iki sany bölejikleriň görälik tizliginiň üýtgemeýändigini aňladýar. ($\left(\vec{\vartheta},\vec{r}\, we \vec{\vartheta'},\vec{r'}\right)$ - elelktronyň we molekulanyň başlangyç we ahyrky tizlikleri). Molekulanyň tizliginiň üýtgemegi elektronyň tizliginiň üýtgemeginden kiçi bolýar:

$$\Delta\vec{r}=-\frac{m\vec{\vartheta}}{M}.$$

Şonuň üçin, $\vec{r}=r^o$ hasap rdip bolýar. Onda,

$$2\vec{r}\left(\vec{\vartheta}-\vec{\vartheta'}\right)=\vartheta^2-\vartheta'^2\approx 2\vartheta\Delta\vartheta$$

,

bu ýerde $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta'$ - kiçi ululyk. Şeýlelikde,

$$(\Delta P)^2 = m^2(\Delta\vartheta)^2 = \frac{m^2}{\vartheta^2}\Big[(\vec{r}\vec{\vartheta})^2 + (\vec{r}\vec{\vartheta'})^2 - 2(\vec{r}$$

Indi bu aňlatmany ortalaşdyrmaly. Birinji molekulalaryň $\vec{r}$ tizlikleriniň paýlanyşygy (Makswell paýlanyşygy) boýunça ortalaşdyrmaly.

$$< r_\alpha r_\beta >= \frac{\delta_{\alpha\beta} < r^2 >}{3}$$

$$< r^2 >= \frac{3T}{M}$$

Şeýlelikde almaly:

$$(\Delta P)^2 = \frac{m^2 T}{M\vartheta^2}(\vartheta^2 + \vartheta'^2 - 2\vec{\vartheta}\vec{\vartheta'}) = \frac{2m^2 T}{M}(1 - \mathrm{c}$$

Ikinji bilen wagt birligindäki wektorlaryň çaknyşyklary boýunça ortalaşdyrmaly; muny $N\vartheta d\sigma$ boýunça integrirläp alyp bolýar. Netijede almaly:

$$B = \frac{Nm^2\vartheta\sigma_t T}{M} = \frac{PmT}{Me},$$

Bu ýerde: $\sigma_t = \int (1 - \cos\alpha) d\sigma$ - ulag kesimi,

e – erkin ykgaw ýolunyň uzynlygy, $e = \frac{1}{N\sigma_t}$

Şeýlelikde,

$$S = -\frac{mP}{Me}(\vartheta f + T\frac{\partial f}{\partial P})$$

Başdaky deňlemäniň elektrik meýdanly düzüjisini hem r we θ üýtgeýänlere özgertmeli:

$$e\vec{E}\frac{\partial f}{\partial P} = eE\frac{\partial f}{\partial P_z} = eE\left(\cos\theta\frac{\partial f}{\partial P} + \frac{\sin^2\theta}{P}\frac{\partial f}{\partial\cos\theta}\right)$$

Fokker – Plankyň deňlemesi

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial P_\alpha}\left[\tilde{A}_\alpha f + \frac{\partial}{\partial P_\beta}\left(B_{\alpha\beta} f\right)\right]$$

$$A_\alpha = \int q_\alpha w\left(\vec{P},\vec{q}\right)d^3 q$$

$$B_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}\int q_\alpha q_\beta w\left(\vec{P},\vec{q}\right)d^3 q,$$

$$f = f\left(t,\vec{P}\right)$$

$w\left(\vec{P},\vec{q}\right)d^3 q$ - wagtyň birligine getirilen agyr bölejigiň $\vec{P}$ impulsynyň ýeňil bölejik bilen elementar amalda – çaknyşykda $\vec{P}+\vec{q}$ impulsa üýtgemeginiň ähtimallygy. Şonuň üçin A_α we $B_{\alpha\beta}$ indiki has düşnükli görnüşinde ýazyp bolýar:

$$A_\alpha = \frac{\sum q_\alpha}{\delta t}, B_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}\frac{\sum q_\alpha q_\beta}{\delta t}$$

$$S_\alpha = -A_\alpha f\left(t,\vec{P}\right) - \frac{\partial}{\partial P_\beta}\left(B_{\alpha\beta} f\left(t,\vec{P}\right)\right)$$

Onda:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{\partial S_\alpha}{\partial P_\alpha}$$

$\vec{S}$ - impulslar giňişliginde bölejikleriň akymynyň dykyzlygy.

$f = c \cdot e^{-\frac{P^2}{2mT}}$ - deňagramlylyk paýlanyşyk funksiýa.

$S = 0$ (deňagramlyk ýagdaýda)

$$\frac{\partial f}{\partial t} = 0 \qquad S = 0$$

$$S_\alpha = -A_\alpha f - \frac{\partial}{\partial P_\beta}\left(B_{\alpha\beta} f\right) = \underbrace{-A_\alpha f - \frac{\partial B_{\alpha\beta}}{\partial P_\beta} f}_{-A_\alpha{}' f}$$

$$S_\alpha = -A_\alpha{}' f - B_{\alpha\beta}\frac{\partial f}{\partial P_\beta} = 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial P_\beta} = f \cdot \frac{P_\beta}{mT}$$

$$-A_\alpha{}' f - B_{\alpha\beta}\frac{P_\beta}{mT}\cdot f = 0$$

$$A_\alpha{}' f = B_{\alpha\beta}\frac{P_\beta}{mT}$$

$$mTA_\alpha{}' f = B_{\alpha\beta} P_\beta$$

Onda,

$$\frac{\partial f\left(t,\vec{P}\right)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial P_\alpha}\left[B_{\alpha\beta}\left(\frac{P_\beta}{mT} + \frac{\partial f}{\partial P_\beta}\right)\right]$$

$$B_{\alpha\beta} = B\delta_{\alpha\beta}$$

$$B = \frac{1}{6}\int q_2 w\left(\vec{P}, \vec{q}\right) d^3 q,$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = B\frac{\partial}{\partial \vec{P}}\left(\frac{\vec{P}}{mT} f + \frac{\partial f}{\partial \vec{P}}\right)$$

Indi, ýeňil agyr gazda diffuziýasy:

$\vec{P} \to P$ (diňe ululygy boýunça)

$$f\left(t, P\right) w^3 P = f\left(t, P\right) \cdot 4nP^2 dP - P$$

ululykly impulsy

$P \div P + dP$ aralykda bölejikleriň sany.

Indi Fokker – Plankyň deňlemesi $4nP^2 f$ funksiüasy üçin:

$$\frac{\partial fP^2}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial P}\left(fP^2 A + B\frac{\partial}{\partial P} fP^2\right)$$

$$\frac{\partial f}{\partial P} = \frac{1}{P^2}\frac{\partial}{\partial P} P^2\left(fA + \frac{B}{P^2}\frac{\partial}{\partial P} fP^2\right)$$

$$B = \frac{1}{2}\frac{\sum\left(\delta P^2\right)}{\delta t}$$

$$\frac{\partial f}{\partial P} = -\frac{1}{P^2}\frac{\partial P^2 S}{\partial P},$$

$$S = -B\left(\frac{P}{mT} f + \frac{\partial f}{\partial P}\right)$$

$$\frac{\partial f}{\partial P} = -e\vec{E}\frac{\partial f}{\partial \vec{P}} = -\frac{1}{P^2}\frac{\partial}{\partial P}P^2 S + N\vartheta$$

$$\int\left[f\left(t, P, \theta'\right) - f\left(t, P, \theta\right)d\delta\right]$$

$$S = -B\left(\frac{\vartheta}{T} f + \frac{\partial f}{\partial P}\right),$$

$$B = \frac{1}{2}\frac{\sum \Delta P^2}{2\delta t}$$

Bölekleýin ionizirlenen gazyň ionizirlemegiň deňagramly derejesiniň peýda bolmagy çaknyşykly ionizirlemegiň we oňa ters bolan çaknyşýan zarýadlanan bölejikleriň rekombinasiýanyň dürli ýönekeý amallarynyň üsti bilen ýerine ýetirilýär. Iň ýönekeý ýagdaýda, haçanda gazda elektronlardan başga ionlaryň diňe bir görnüşi bar bolanda, ionizirleme deňagramlyk indiki deňleme arkaly beýan edilýär:

$$\frac{dn_e}{dt} = \beta - \alpha n_e n_i$$

$\beta - 1s,1sm^3$ - da peýda bolýan elektronlaryň sany (neýtral atomlaryň çaknyşyklary arkaly ýa – da atomlary fotonlar arkaly ionizirleme arkaly).

α - rekombinasiýanyň koeffisiýenti. Deňlemäniň ikinji ogtasy elektronlaryň sanynyň peselmegini berýär (rekombinasiýa sebäpli).

Deňagramly halda $\frac{dn_e}{dt} = 0 \Rightarrow$

$$\beta = \alpha n_{oe} n_{oi}$$

$$\alpha = < \vartheta_e \cdot b_{ren} >$$

Rekombinasiýa iki görnüşe bölünýär: radiasion we çaknyşyk rekombinasiýa.

Rekombinasiýa prosesi plazmadaky deňagramlyk ýagdaýa getirýän beýleki proseslere görä örän haýal proses bolup durýar. Sebäbi rekombinasiýanyň netijesinde bölünip çykýan energiýany alyp äkidýän prosesler bolmaly (ýa – da radiasion rekombinasiýa foton äkitmeli ýa – da üçünji atoma çaknyşykdan soň bermeli çaknyşyk rekombinasiýa).

Çaknyşyk rekombinasiýany „Energiýa boýunça diffuziýa“ diýip hasap edip bolýar. Onda bu prosese Fokker – Plankyň deňlemesini ulanyp bolýar:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial P_\alpha}\left[A_\alpha f + \frac{\partial}{\partial P_\beta}\left(B_{\alpha\beta} f\right)\right]$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{\partial S_\alpha}{\partial P_\alpha},$$

$$S_\alpha = -\tilde{A}_\alpha f - B_{\alpha\beta}\frac{\partial f}{\partial P_\beta}$$

Indi energiýa boýunça:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{\partial S}{\partial \varepsilon}, \qquad S = -B\frac{\partial f}{\partial \varepsilon} - Af,$$

$$S = 0 \quad f = f_0 \Rightarrow$$

$$S = -Bf_0 \frac{\partial}{\partial \varepsilon}\frac{f}{f_0},$$

$$B(\varepsilon) = \frac{\sum(\Delta\varepsilon)^2}{2\delta t}$$

$$f\left(\vec{P},\vec{V}\right)_0 = \frac{e^{-\frac{\varepsilon}{T}}}{\left(2nmT\right)^{3/2}},$$

$$\varepsilon = \frac{P^2}{2m} - \frac{ze^2}{V}$$

z – elektronlar.

5. Çaknyşyksyz plazma.

Özylalaşylan içki meýdan.

Kinetiki nazaryýeti plazmany öwrenmekde giňden ulanylýar. Plazma - bu doly ionizirlenen gazdyr. Plazmany iki düzüjili diýip hasap edeliň. Onda diňe elektronlar (elektrik zarýady „e“) we zarýady 2e deň bolan bir görnüşli položitel ionlar bar diýeliň. Hemişelik gazlar üçin plazma ýaly kinetiki deňlemesiniň ulanylmagy, onuň ýeterlik derejede seýrek bolmaklygy talap edýär. Gaz hyýaly halynda gowşak gyşarmaly. Kulon güýçleriň haýal peselmegi sebäpli bu şert plazma üçin neýtral gazlara görä has güýçli bolýar.

Plazmanyň gowşak hyýaly däl şerti şeýle ýazylýar:

,

bu ýerde T - plazmanyň temperaturasy, n - göwrüm birligindäki bölejikleriň doly sany, $\vec{r} \sim \sqrt[3]{n}$ - bölejikleriň arasyndaky orta aralyk. Bu şerti başgaça görnüşde hem ýazyp bolýar: $\dfrac{e^2 n^{1/3}}{T} \sim \dfrac{\vec{r}^{\,2}}{4\pi a^2} \ll 1$, bu ýerde a - plazmanyň Debaýyň radiusy.

$$a^{-2} = \frac{\psi\pi}{T}\sum_{\alpha} n_{\alpha}\left(r_{\alpha}e\right)^{2}$$

α - ionlaryň görnüşleriniň sany boýunça üýtgeýän indeks. Debaýyň radiusy plazmada zarýadyň Kulon meýdanynyň ekranirleme aralygyny kesgitleýär. Eger - de $\alpha = 1, n_{\alpha} = n, z_{\alpha} = 1$ bolsa, onda

$$a \sim \sqrt{\frac{T}{\psi\pi n e^{2}}} \Rightarrow \frac{e^{2}n^{1/3}}{T} \sim \vec{r}^{\,2} / \psi\pi a^{2} \ll 1$$

Seýrek plazmada bölejikleriň arasyndaky orta aralyk Debaýyň radiusyndan kiçi bolmaly.

Plazmany kadaly diýip hasap edeliň. Bu plazmanyň temperaturasy onuň elektron düzüjisiniň wyrožden bolmagy halynyň temperaturasyndan uly bolmaklygyna getirýär:

$$T \gg \frac{\hbar^{2}n^{2/3}}{m}, \qquad \text{m - elektronyň massasy.}$$

Plazmadaky bölejikleriň her kysymy üçin kinetiki deňleme şeýle ýazylýar:

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\vec{\vartheta}\frac{\partial f}{\partial \vec{r}}+\vec{P}\frac{\partial f}{\partial \vec{P}}=Stf$$

Plazmadaky elektrik zarýadlanan bölejige täsir edýän elektrik we magnit meýdan:

$$\vec{e}=\vec{E}+\vec{e}^{\,1}$$

$$\vec{h}=\vec{B}+\vec{h}^{\,1}$$

Bu ýerde $\vec{E}$ we $\vec{B}$ - köp bölejikleri özünde saklaýan ýaýlalar boýunça meýdanlaryň orta bahalary. Bu ýaýlalaryň ölçegleri bölejiklerara aralyklara görä uly, ýöne şol wagtda Debaýyň radiusyna görä kiçi.

Şu bölümde plazmanyň bölejikleriniň arasyndaky çaknyşyklar ýok diýip hasap edeliň. Bu ýagdaýda çaknyşyksyz plazma diýilýär. Bu hadysalaryň şerti: $\nu < c\omega$, ν - çaknyşyklaryň effektiw ýygylygy, $\omega - \vec{E}$ we $\vec{B}$ meýdanyň üýtgemeginiň ýygylygy. Şeýlelikde, çaknyşyklar integraly Stf onuň $\frac{\partial f}{\partial t}$ önümine görä kiçi bolýar. Bu ýagdaýda kinetiki deňleme şeýle ýazylýar:

$$\frac{\partial f_e}{\partial t}+\vec{\vartheta}\frac{\partial f_e}{\partial \vec{r}}-e\left(\vec{E}+\frac{1}{c}\left[\vec{\vartheta}\times\vec{B}\right]\right)\frac{\partial f_e}{\partial \vec{P}}=0$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial t}+\vec{\vartheta}\frac{\partial f_i}{\partial \vec{r}}+ze\left(\vec{E}+\frac{1}{c}\left[\vec{\vartheta}\times\vec{B}\right]\right)\frac{\partial f_i}{\partial \vec{P}}=0$$

Bu deňlemelere Makswelliň deňlemelerini goşmaly:

$$rot\vec{E}=-\frac{1}{c}\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$$

$$div\vec{E}=\psi\pi\rho$$

$$rot\vec{B}=\frac{1}{c}\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}+\frac{\psi\pi}{c}$$

$$div\vec{B}=0$$

$$\rho=e\int\left(zf_i-f_e\right)d^3P$$

$$\vec{j}=e\int\left(zf_i-f_e\right)\vec{\vartheta}d^3P$$

Bu ýerde ρ we $\vec{j}$ - radiuslaryň we akymlaryň orta dykyzlyklary.

Şu deňlemeleri arkaly kesgitlenýän orta $\vec{E}$ we $\vec{B}$ meýdanlara özara ylalaşylan diýilýär.

Edebiýat

1. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşiň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. I tom. Aşgabat, 2008.
2. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşiň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. II tom. Aşgabat, 2009.
3. Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. Физическая кинетика. - М., Наука, 1979
4. Ч. Киттель. Статистическая термодинамика. - М., ИЛ, 1977
5. Ч. Киттель. Элементарная статистическая физика. М., ИЛ,1960
6. Р. Кубо. Статистическая механика. М., ИЛ,1962
7. М.А. Леонтович. Статистическая физика. М.-Л., 1944
8. А. Хилл. Статистическая механика. М., ИЛ, 1960
9. К. Хуанг. Статистическая механика. М., Мир, 1966
10. В.Г. Левич. Курс теоретической физики. М., Физматгиз, 1962

Mazmuny